累積スペクトラム解析で動特性を可視化する

負荷インピーダンス変動がパワーアンプに及ぼす影響

新井悠一 ARAI Yuichi

前号で調べたスピーカーユニット（ドライバー）のインピーダンス変化によるアンプの駆動電圧の変化や駆動周波数特性，結果としてのスピーカーからの音圧特性との相関性に続いて，今回はインパルス応答を測定し，累積スペクトラム解析をすることによって，負荷インピーダンスの変化による動特性の差異について調べた．

アキュフェーズP-300X半導体パワーアンプ

測定装置と手順

実験には前回同様KT88ppの真空管パワーアンプ（**写真1**）と，半導体アンプとしてアキュフェーズのP-300Xパワーアンプ（**タイトル写真**）を使用しました．目的はアンプ特性の比較ではなく，あくまでも負荷インピーダンスの変化の影響度を調べるものです．アンプ固有の特性も無視できませんが，ここでは出力インピーダンスの高いKT88を中心に，出力インピーダンスの低いP-300Xをリファレンスにして話を進めていきます．

手順は**図1**に示すように，PCからMLS（Multiple Length Sequence）連続インパルスを出力し，パワーアンプに与えます．パワーアンプの出力側には純抵抗またはスピーカーシステムを負荷として接続し，出力波形を観察します．この出力波形をFFT（高速フーリエ変換）すると周波数特性になりますが，時間をずらして次々とFFTすると，周波数特性の時系列特性，つまり累積スペクトラムがわかります．

累積スペクトラムを観察すると音の動特性が可視化でき，どのような響きに聴こえるのかの参考になると思います．

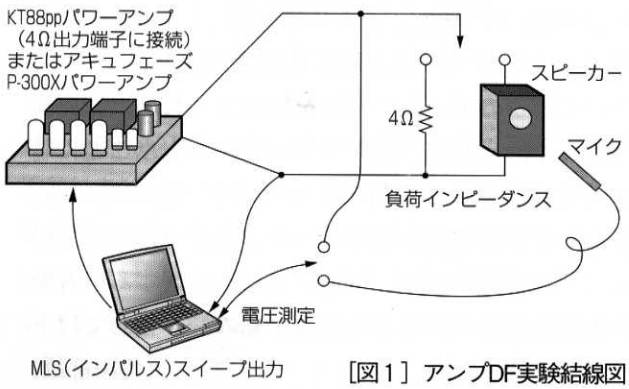
また，累積スペクトラムだけでは電圧の高さや音圧の強さがわかりにくいので，パソコン上の色による強弱の表示も併用しました．

今回使用した被測定スピーカーシステムは，前号と同じくパークオーディオ（ドリームクリエーション）の13cm口径ウッドコーンフルレンジドライバーDCU-F13Wを小型バスレフエンクロージャーにマウントしたシングルシステム（**写真2**）です．ボイスコイルの公称インピーダンスが4.5Ωだったので，KT88アンプの場合，断わりのない場合は4Ω出力端子に接続しました．

次の測定方法としてスピーカーから放射される音圧をマイクで拾い，同様にFFTして累積スペクトラム特性を観察しました．

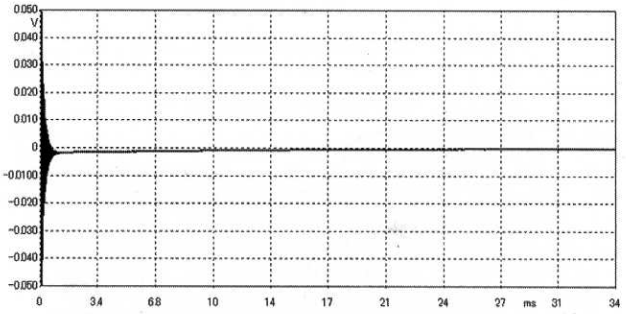
測定システムはCLIOを用いましたが，MLSを用いる測定法はPCソフトだけの測定システムでも容易にできるので，市場に出回っている各種ソフトを利用することもできます．

［写真1］オーディオ専科のKT88プッシュプルパワーアンプ

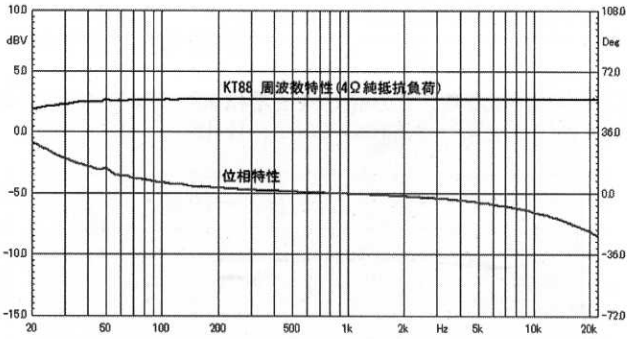


［図1］アンプDF実験結線図

[写真2] DCU-F13Wとバスレフエンクロージャー



[図2] KT88ppアンプの駆動電圧インパルス応答（4Ω純抵抗負荷）



[図3] KT88ppアンプのMLS法による駆動電圧の周波数特性と位相特性（4Ω純抵抗負荷）

真空管アンプの動特性測定

(1) 純抵抗負荷による測定

図2がアンプに4Ω純抵抗負荷を接続したときのアンプ出力端子におけるMLS波形です．波形なので横軸は時間軸です．ここでの表示は0～34ms間の波形が表示してあります．

これをFFTすると横軸が時間軸から周波数軸に変換されるので**図3**が得られます．上のカーブがアンプの周波数特性で，左端にその目盛が5dB間隔の横線で打たれています．もう一つのカーブが位相特性です．右端が位相の度数目盛です．中域が位相0，低域で進み，高域で遅れます．

このインパルス応答から累積スペクトラムを計算すると**図4**が得られます．一番奥が時間0での特性，つまり周波数特性で，**図3**の上のカーブと同一です．手前に来るに従って1msずつ時間を遅らせた時点での周波数特性となります．この図ではスペクトラムを30個表示しているので，一番手前のカーブは30ms後の特性となります．**図2**のインパルス応答の表示長が34msだったので，おおむねこの間の周波数特性の変化を示していることになります．

周波数軸は20Hzから10kHzまでとしました．この図から判断すると，低域での収束にやや時間がかかっているようですが，これはアンプ単体の特徴なのでしょう．

これだけでは電圧の高さが見にくいので，**図5**では同じ累積スペクトラム2次元表示として，パソコン上では電圧の高さを色で表示しました．高さと色の関係は右端に表示されます．この図の上は時間0で，下がるに従い時間が経過します．これによってどの領域が高く，時間とともにどのように変化していくかがわかります．

(2) スピーカー負荷による測定

前号の実験でKT88の4Ω端子の出力インピーダンスが2.15Ωとわかっているので，4Ωの純抵抗負荷の場合，DF（ダンピングファクター）は約2となります．ここで目的とするスピーカーを4Ω純抵抗の代わりに接続し，同様の測定を行います．

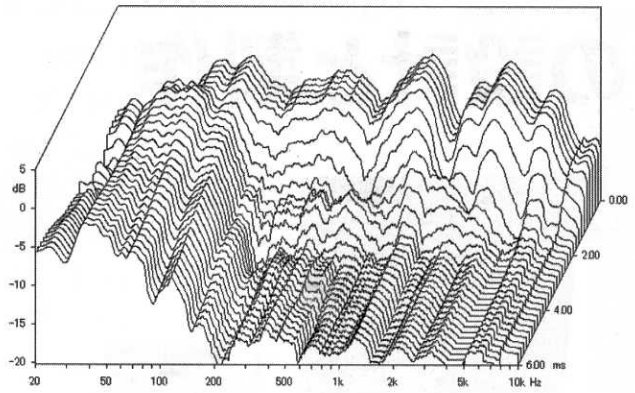
インパルス応答（**図6**）は，**図2**と比べても変化はよくわかりません．わずかに**図6**がインパルス終了後に電圧が下がっていますが，トランス結合のアンプの場合，直流伝送ができないためと思われますが，確証はありません．

このインパルスを同条件でFFTし，累積スペクトラムを求めると**図7**となり，30ms経過するまで低域が騒々しく変化することがわかります．左手奥の収束に時間がかかるのはアンプの個性としても，山谷はインピーダンス負荷の影響が大きいのでしょう．

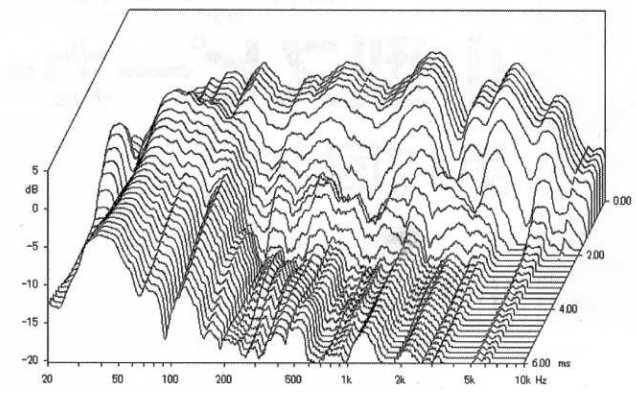
ここで時間0の特性，つまり一番遠くのカーブは**図4**と違ってフラットではありません．前号で述べたように，スピーカーのインピーダンス変化の影響を受け，低域に緩やかなふた山ができ，時間とともに変化し収束していきます．

また，高域になるに従って徐々に上昇する駆動特性となっていますが，累積スペクトラム上はあまり影響が出ていません．負荷インピーダンスの変化が大きい低域でアンプの駆動特性も変動してしまうことがよく表れています．

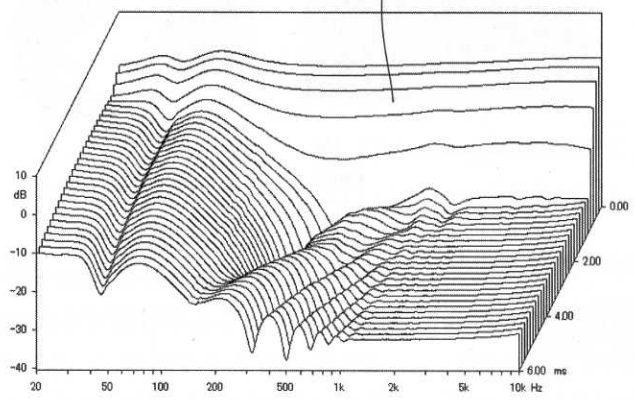
電圧の高さを色表示すると**図8**のように低域の変化が複雑になっ



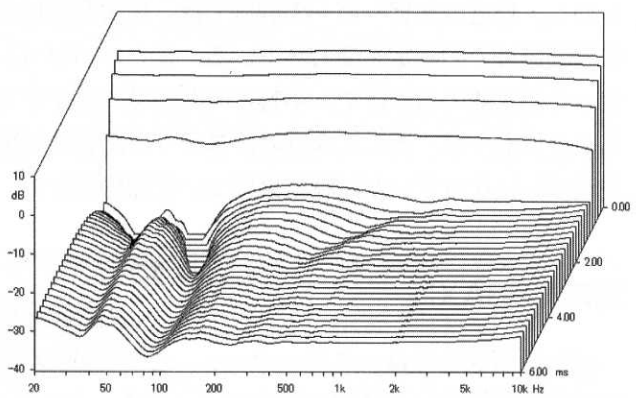
[図22] KT88ppアンプの音圧累積スペクトラム（SP負荷，全奥行き6ms，20Hz～1kHz）



[図23] P-300Xアンプの音圧累積スペクトラム（SP負荷，全奥行き6ms，20Hz～1kHz）



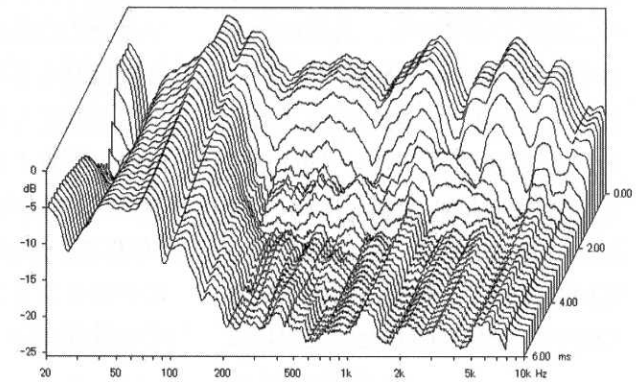
[図24] KT88ppアンプの駆動電圧累積スペクトラム（SP負荷，全奥行き6ms，20Hz～1kHz）



[図25] P-300Xアンプの駆動電圧累積スペクトラム（SP負荷，全奥行き6ms，20Hz～1kHz）

特性を示します（**図24，25**）．KT88では低域がいつまでも収まりませんが，これはダンピングの差異によるものと思われます．

最後にKT88の16Ω出力端子に接続した場合の特性を**図26**に示します．16Ω端子の場合，計算上は公称DFが0.5となります．こうなると**図22**と比べても低域の音圧上昇はかなり高くなり，また山脈も高く，かなり変わった特性になります．16Ω出力時には駆動電圧の絶対値も高くなるので全体に音圧が高くなります．



[図26] KT88ppアンプの音圧累積スペクトラム（16Ω出力端子，全奥行き6ms，20Hz～1kHz）

まとめ

今回は累積スペクトラム特性を中心に，出力インピーダンスの高い真空管パワーアンプと，出力インピーダンスの低い半導体アンプの動特性の差異を調べました．

前回の静特性のデータと併せて察すると，出力インピーダンスの高いアンプの場合，音が温かく聴こえたりする一つの物理的要因なのかもしれません．重箱の隅をつつくような実験でしたが，少なくとも物理的な有意差ははっきりしているようです．

全帯域にわたってDFが高い半導体アンプと異なり，真空管アンプの場合，スピーカーシステムをどのように選ぶか，平たく言えば相性が音質に大きな影響を与えると考えてよいと思います．また，どの出力端子にスピーカーを接続するかも大きな影響を与えます．こういう意味で好みも含め，真空管アンプの楽しみは尽きないのかもしれません．

いっぽう，半導体アンプであっても，DC抵抗が大きくなってしまうような，極端に長いまたは細いスピーカーケーブルはDFを下げてしまうので注意が必要です．